

ウェルネス・エンタテインメントとフラクタル科学

－リハ支援／MCI予防への可能性－

Wellness Entertainment and Fractal Science

－Potential for rehabilitation support / MCI prevention－

長嶋 洋一

Yoichi NAGASHIMA

要旨 (Abstract)

メディアアートとは、20世紀半ば以降に生まれたテクノロジーを駆使した芸術表現、あるいは新技術／メディアによって生み出される芸術の総称である。本論文ではメディアアートの世界を起点として、「インタラクティブ・マルチメディア」「カオス／フラクタル」「生体情報センシング」「エンタテインメント・コンピューティング」「スケッチング(物理コンピューティング)」「オープンソース文化」などの展開から、「バイオフィードバック・リハビリテーション」と出会ったコラボレーション、そして「ウェルネス／ウェルビーイング」を目指す「ウェルネス・エンタテインメント」の追求へと発展した経緯について紹介し、その将来性と課題について考察する。

後天的障害から回復するリハビリテーション、あるいは生来的障害を克服する「ハビリテーション」を支援するためのバイオフィードバック・システムとして、メディアアートが生み出してきたインタラクショナルデザインやマルチモーダルインターフェースや生体情報センシングという技術は本質的に効果的である。さらに最近の認知心理学や脳科学などの進展に対応して、クライアントの自己意識(→心身医学)に繋がるウェルネスないしウェルビーイングを目標として、また軽度認知障害(MCI)の予防／回復において、「内受容感覚」および「脳活性化」をキーワードとしたアプローチを提唱した。ここでは最新のコンピュータ技術によって、マルチメディア心理学のテーマの一つ「錯覚」の活用、あるいはフラクタル科学の活用を追求している。

キーワード：メディアアート、フラクタル、内受容感覚、バイオフィードバック・リハビリテーション、ウェルネス・エンタテインメント

1. はじめに：リハビリテーションとハビリテーション

ヒトに限らず全ての生物において恒常性(ホメオスタシス)の維持は基本的な本能であり、恒常性の維持された「健康」とは「身体的／精神的／社会的に完全に良好な状態であり、単に病気／虚弱でないことではない」とある。この健康あるいは日常的活動が阻害された状態、すなわち「病気／障害／不自由」などに対して、医学は主として生命に関係するトラブルからの復帰を目指すのが、生命の危機を脱して機能低下の状態が残った障害者(クライアント)に必要なのがリハビリテーション(rehabilitation)である。これは「能力低下の状態を改善し、障害者の社会的統合を達成するための手段、障害者が環境に適応するための訓練」(WHO1981)²⁾、さらに前向きに「身体的／精神的／社会的に最も適した生活水準を達成することで、各人が自らの人生を変革していくことを目指す過程」³⁾、と定義され、その歴史は長い。

そして、ヒトは健康だけでなくさらに「快」を伴うホメオスタシス、すなわちウェルネス(Wellness)あるいはウェルビーイング(Well-being)を無意識／意識的に強く求める存在となった。Halbert L. Dunnが提唱したウェルネス／ウェルビーイングとは、「個々人が前進／成長して、より高い機能を獲得する可能性に向かって向上する変化の状態」という概念⁴⁾である。古典的なリハビリテーション(物理療法／作業療法)のみならず、ストレス社会におけるメンタル領域を主対象とした心理療法／言語療法／音楽療法／芸術療法な

どで特にウェルネスが再注目されており、本研究はこの点を強く意識したものである。

上述のように一般に「リハビリテーション」は「獲得済みの機能が何らかの原因で失われたときに行われる」のに対して、Anthony L. Brooks⁵⁾は「ハビリテーション(habilitation)」という概念を「出生前後に罹患した病気や外傷によって起きる先天的な障害を持った者の、もともと獲得されていない機能の獲得」と定義し、メディアアート(特にインタラクティブなシステム応用)がこの領域に大きく貢献できる可能性を提唱した⁶⁾。またハビリテーションにおいては、クライアント自身が欠けた機能に相当する活動を体得するだけでなく、それを支援するセラピスト/支援者自身もメンタルヘルス(協調共鳴感覚)によりウェルネスが向上した、という報告⁷⁾も重要である。

以上のような背景のもと、本論文ではメディアアートの領域で研究者およびコンピュータ音楽の作曲家として約35年活動してきた筆者の視点から、関わってきた色々な関連領域での展開、そしてバイオフィードバック・リハビリテーション専門家との出会い/コラボレーション(共同研究)に発展し、さらに脳科学/認知科学やフラクタル科学と関連してウェルネス/ウェルビーイングを目指す「ウェルネス・エンタテインメント」の追求へと向かってきた経緯について紹介し、その将来性と課題について考察する。

II. コンピュータ音楽とフラクタル科学

1. メディアアートとコンピュータ音楽

メディアアート(Media Art)の形態は、コンセプチュアルアート、ビデオアート、コンピュータアート、ネットコンテンツ、インスタレーション、パフォーマンス、コンピュータ音楽などの範囲に及ぶ。美学的方針から大きく分類すると、(1)非実時間的なスタジオワーク制作作業の成果物としてのマルチメディア・コンテンツ(固定メディア)を再生鑑賞する「タイムライン作品」の形態(映像作品[Movie/DVD/YouTube]、音楽CD、プロジェクトマップ等)と、(2)リアルタイムに相互作用(インタラクション)するアルゴリズムによって毎回異なったマルチメディア体験をライブ生成する「インタラクティブ作品」の形態(インスタレーション、[音楽/舞蹈/演劇]パフォーマンス、ゲーム等)とに二分される。ごく簡単に言えば、前者は「鑑賞」するものであり、後者は「体験/参加」するものである。政治的/経済的な意図からか日本の文化庁はアニメや漫画や商用ゲームまでメディア芸術と呼んでいるが、世界的には是認されていない。(ここで簡単に「ゲーム」について補足しておく、海外では単なる遊興ゲーム(ゲーセン/テーマパーク)や商用ゲーム(ゲーム機/スマホアプリ)でない「シリアスゲーム」という分野が一つのジャンルとして重要視されてきた。これは「役立つゲーム」という意味で、教育/文化/福祉/医療などの領域でビジネスとしての経済的成功とは異なる次元で「人類の文明に対する貢献」を追求するものであり、特に欧州では公的機関が支援してきた歴史が長い)

筆者は、楽器メーカーでコンピュータ・エレクトロニクス分野の研究開発エンジニア(約10年)を経て国家資格「技術士」(情報工学部門および電気電子部門)を取得し独立してから約35年、おもに「インタラクティブComputer Music」の領域を中心として活動してきた。コンピュータの歴史と同じ長さを持つ「コンピュータ音楽」は、1980年代までは主として「アルゴリズムによって生成された楽譜」を人間の演奏家が演奏したり、いわゆる「打ち込み音楽(DTM)」としてタイムラインに沿ったサウンド要素を記述して自動再生する、固定的な音楽(基本的には毎回同じことが起きる)だった。しかし1990年頃から筆者が取り組んだ「インタラクティブComputer Music」とは、その場で生み出される音楽がセンサや偶然性/環境などに応じて「変容する」タイプのパフォーマンスであり、作曲の一部として新楽器(新センサ)を開発し、ライブに音響/映像を変化させるアルゴリズムを走らせて公演する、という形態である。本研究もこの延長にあり、古典的な「鑑賞する」(受け身)という作品形態よりも、発展的な「体験する」(能動的)応用としてリハビリテーションやウェルビーイング/ウェルネス領域に新たな可能性を提案し、さらにオープンソース文化の潮流を活用して専門家でなくてもシステムをデザインできる「フレームワーク/ツールキット」(役立つシステムを生み出すことを支援する環境)という可能性を追求している⁷⁾。

2. カオスとフラクタルと非線形科学

拡大してみるとまた同じ繰り返し構造が現れてくる「フラクタルの美」(有名な「マンデルブロ集合」や「ジュリア集合」など)は、プログラムが自分自身をサブルーチンとして呼び出す「再帰的アルゴリズム」によって生み出され、デザインにおいて「数理造形」というジャンルに属する。これは偏微分方程式として決定的に記述されているにも関わらず将来的な振舞いが不明(不確定)である、という「複雑系／非線形システム」として、自然科学における重要性がベルタランフィ⁸⁾やプリゴジン⁹⁾によって提唱されてきたものであり、その一分野として現在も研究が進む「同期」理論は生体リズムや時間学的リズムの基本でもある¹⁰⁾⁻¹²⁾。なお最近では、社会科学／人文科学の領域においても非線形システムの「複雑系思考」が重視されてきている。

フラクタルを生み出す再帰的方程式のパラメータを微小に変化させると、システムは決定論的に不確定な「カオス」状態に移行する現象も興味深いものである。典型的な「ロジスティック関数」を厳密に数理表現した上で「フラクタル→カオス(ランダム)」へ変化する「カオスの淵」(ちよんとつつくと押し返してくる生き物のような振る舞い)を追求した実験¹³⁾を基に、筆者も1990年代前半に実際にコンピュータ音楽作品として作曲／公演した¹⁴⁾。コンピュータ音楽に関してのカオス関連研究はその後も続けており¹⁵⁾⁻¹⁶⁾、本研究においてもライブ生成したフラクタルをインタラクティブにバイオフィードバック・コントロールする、という文脈で受け継がれている¹⁷⁾。

III. インタラクティブ・メディアアートとオープンソース文化

1. プラットフォーム：Max

メディアアートを実現するためには、システムを実現するためのプラットフォーム(開発環境／実行環境)が必要であり、筆者の場合には米国Cycling'74社が提供する"Max"を30年以上、活用している¹⁸⁾⁻²²⁾。Maxは、1980年代後半にフランス国立音楽音響研究所IRCAMにおいて信号処理システムISPW(IRCAM Signal Processing Workstation)専用のGUIとして開発されたMax/FTSが起源である。開発した研究者の一人David Zicarelliが研究成果を一般に普及させるために、Cycling'74社を起業しMac版として公開²³⁾してから35年近くになるが、その卓越した設計思想(言語的に記述するのではなく、機能ブロック同士をラインで結ぶだけのプログラミング)は近年になってようやくLabViewやScratchなどが真似てきたものである(もう一人の共同研究者Miller PucketteはMaxと類似したフリーのPureDataをUnix環境で提供)。そして機能を拡大するバージョンUPと共にプログラム("パッチ"と呼ぶ)の上位互換性を確保して、「30年前のMaxパッチが現在のバージョンのMaxでも走る」という事実は、3~4年で過去バージョンのデータが使えなくなる(だけでなく自分自身も淘汰され消えてしまう)大部分のソフトウェアにはとうてい真似できない驚異的なものである。

プログラミングやエレクトロニクスが苦手なアーティストでもシステムをデザインできるMaxは、パッチをtext保存できることでメールでの共有やWeb上での共有というオープンソース文化をそのまま体現してMaxコミュニティを成長させてきた。先人の作ったパッチを新人が活用し、完成した実験／試作パッチをユーザーForumで共有し、ビギナーの質問にベテランが回答する、というMaxの膨大な知的財産は世界中で交流し共有されている。文系の学生でも容易にマスターしてオリジナルのインタラクティブ作品をデザインできるMaxの有効性は、本研究のベースとなる多くの場(公開のワークショップやレクチャーやセミナーなど)で立証されており、バイオフィードバックとのコラボレーションにおいても重要な基盤となっている。奈良学園大リハビリテーション学科／研究科で筆者が担当する「先端リハビリテーション論」においても、Maxを活用した事例を紹介するイントロダクションが好評である。

2. 広義のセンサと広義のディスプレイ

システムとして工学的に整理すると、ライブ・コンピュータ音楽から科学館／テーマパークの体験的展示インスタレーション、さらにゲームにまで共通するのは、(1)人間や環境など外部からの情報を入力する広義の「センサ」、(2)システムから人間や外部の環境へ応答出力する広義の「ディスプレイ」、そして

(3)入力情報と出力情報との間のインタラクション(関係性/反応/応答)を実現するためのアルゴリズム(を
実装したコンピュータ)、という3要素である(図1)。

「入力」のセンサを人間の感覚に対応させれば「視覚」「聴覚」「味覚」「嗅覚」「触覚」「温覚」な
どと区別されるが、いずれも「光」「音」「イオン濃度」「圧力」「加速度」「温度」などの物理量や化
学量が基本であり、自然界の物理的状態(化学的性質を含む)に対応した電気的信号を媒介としたセンサか
ら入力情報に変換するもの、と統一できる。

一方「出力」では一般的なディスプレイという用語は視覚的装置と思われるが、遠隔地のロボットハン
ドの指先に配置した触覚センサ情報(反発/触感)を操作者のグローブに返す「フォースディスプレイ」(力
学的ディスプレイ)を典型として、スピーカやイヤホンは「音響ディスプレイ」として、ペルチェ素子によ
る「発熱/吸熱デバイス」は熱的ディスプレイとして見なすことで、広義のディスプレイはシステムから
の情報を物理量として外界(人間を含む)に返すものである、と整理できる。

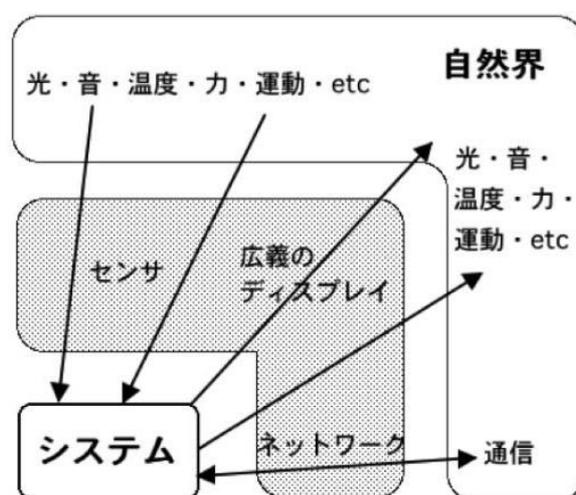


図1 インタラクティブ・システムの構成

以上のようにメディアアートを実現するシステムを分析してみると、個々の要素はコンピュータ・エレ
クトロニクス技術の進展とともに新しく登場してくる各種のセンサ群や出力デバイス群、後述する各種の
「出張所」としての汎用マイコン群、そしてMaxやProcessingやFlashやUnityなどのインタラクションを記
述するPCプラットフォーム群とそのアルゴリズム、という一種のブラックボックス(後述)の集合体と整理
できる。筆者はこの分野で世界先端の研究者/専門家との交流を続けて、関連するテーマで2000年
Berlin²⁴⁾、2004年Amsterdam²⁵⁾、2007年台湾²⁶⁾、2009年Paris²⁷⁾、2016年Moscow²⁸⁾、2018年Poland²⁹⁾、2022年
Linz³⁰⁾など海外でレクチャー/ワークショップを行い、国内でも多くの大学で開催してきた。

3. オープンソース文化：プロトコルと汎用マイコン

前項においてシステムを構成する各種の要素を「ブラックボックス」と総称したのには理由があり、こ
れは21世紀テクノロジーのキーワード「オープンソース文化」として見逃せない重要ポイントである。
1990年代までは、例えば何か新規なセンサが開発されたという場合、エンジニア/デザイナーはメーカの
データシートを解釈して、そのデバイスをマイコンで扱うための専門的なドライバ・プログラムをまず開
発して、その後にシステムの一部として取り込む必要があった。しかし現在では、メーカが新デバイスを
提供する場合、Arduinoなどの汎用マイコンでこのデバイスを活用するための「ライブラリ(ドライバ群と
サンプル集とマニュアル)」一式を、Webで無償公開するのが常識となった。これによって、高度で専門的
な知識を必要とせず新技術をシステムに統合することが容易になって、理工系のみならず文系/芸術系
さらには医療系の学生でもシステム開発が可能な時代となった。

システム入出力の「出張所」や簡単なシステムの中核となる汎用マイコン(組み込みマイコン)において、かつて日本メーカは閉鎖的な縛り(契約企業以外に技術情報を公開しない)によってユーザを囲い込む戦略をとっていた。一方、世界的にはオープンソース文化の浸透からBasicStamp、Gainer、Arduino、Propeller、mbed、Raspberry Piなど各種の汎用マイコンが登場し、関連する全ての技術情報がWeb上に完全公開され、ライブラリやソースコードもフリー公開される中で「みんなで知的財産を共有してみんなでハッピーになる」時代となった。その結果、日本メーカのマイコンは駆逐されただけでなく、メーカやブランドそのものが淘汰され消滅してきた³¹⁾。

ソフトウェア・オープンソースの典型例として、カリフォルニア大学バークレー校のCNMATが提唱/公開したOSC(Open Sound Control)³²⁾は、最初はネットワークを介して音楽システム同士が通信するプロトコルだったものの、現在ではネットワークに繋がるほぼ全ての処理系/プラットフォーム(Csound、Flash、Max/MSP、openFrameworks、Processing、PureData、Reaktor、SuperCollider、Unity等)が相互に通信できる汎用プロトコルへと成長した。また、汎用マイコンの主演として普及したArduinoのためのファームウェアである”Firmata”³³⁾もオープンソースの賜物で、Firmataを書き込みしたArduinoに対して、膨大な処理系(processing、python、perl、ruby、javascript、java、.NET、PHP、iOS、Max/MSP、Smalltalk、LabVIEW等)が「Firmataを書き込んだArduino」を汎用入出力の「出張所」としてブラックボックス的に活用できるようになった。例えばMaxの場合には、“maxduino”というMax側のライブラリがフリー提供されているので、「Firmata-maxduino」間の通信(プロトコル)を詳細には知らなくても、Maxユーザは自由にArduinoを介した入出力をシステムに実装できる。

オープンソースは上述のようにソフトウェアから発展してきたが、「IoT」(Internet of Things)の視点から「ハードウェア・オープンソース」が2010年頃から飛躍的に発展している。一例としてARM社がマイコンの中核システム(CPUコア)をオープンソースとしたことで、“mbed”シリーズの汎用マイコンは世界中のメーカから100種類以上が登場するに至った。現在では汎用マイコンの全てが、デバイス自体は工業製品として購入する(ネットショップで個人でも可能)ものの、データシートからライブラリ(ドライバ群とサンプル集とマニュアル)までの知的財産はWeb上で誰でも無償で入手でき、サンプルプログラムの交流や作品事例紹介のWeb上ミュージアムを含めて、まさに「みんなでハッピーになる」時代となった。

IV. 生体情報センシングとバイオフィードバック

1. 新楽器と新インターフェース

音楽の世界において、「楽器」とは演奏者が操作して音楽音響を生み出す「道具」であると共に、生成される音響のニュアンスを演奏者自身に返す「広義のディスプレイ」でもある。単に演奏音響が空間に放射されて聴覚的に聞こえるだけでなく、操作子(鍵盤、弦、指穴、ばち、マウスピース、その他、演奏者と楽器との接点全て)からの接触感覚は、ライブ・インタラクションの繊細なインターフェースとして最終的な音楽に大きく影響する。歴史に裏付けられた各種の伝統楽器/民族楽器はその発展の集大成でもあり、コンピュータ音楽における「新楽器」の多くは、伝統楽器にピックアップ/マイクを取り付けただけのものからスタートして、伝統楽器に似せた操作子の形状や、洗練された伝統楽器の演奏形態を模したものが非常に多かった³⁴⁾⁻³⁵⁾。

その一方で、コンピュータ音楽がメディアアート(テクノロジーアート)の一種である長所を生かして、新技術として登場した各種のセンサを音楽生成のインターフェースとして活用することで、従来は存在していなかった新しい演奏形態を提案することも一つの主流となった³⁶⁾⁻³⁷⁾。有名なテルミン(2つのアンテナと両手との距離のニュアンスからピッチと音量を制御する電気楽器)において、演奏されるレパートリーはクラシックのバイオリン曲が重宝されてきたが、筆者が開発した「32チャンネル・テルミン」では既存の演奏形態とも既存の音楽音響とも訣別した新しいスタイルを追求した³⁸⁾⁻³⁹⁾。紙面の制限でこれ以外の「新楽器と新インターフェース」の例は省略するが、過去のレクチャー資料は全てオープンソース文化に則ってWeb公開しており、その中で個々の作品事例と共に解説しているので参照されたい^{24)-28) 35)}。

2. 生体情報センシングと筋電楽器

ポピュラーミュージックを含む古典的音楽と伝統的楽器の世界において、大部分は演奏者とのインターフェイスに「手」を、さらには「指」を最重要視してきた。管楽器／弦楽器／打楽器などを思い浮かべてみると、演奏者が「手」を使っていない楽器というのはほぼ皆無である事に驚かされる。これは人間工学的に、両腕と手首から先(五指)のコントロール可能性／柔軟性が非常に豊富であり、さらに指や手から「触覚」として得られる物理的フィードバック情報量が膨大であることの証しである(手指の「ツボ」の効能がほぼ全身に及ぶ点にも注意)。ピアノを例にとると、ピアニストは音高(音階)に対応した鍵盤の1鍵ごとにタッチを変えて音量／音色／音長のニュアンスを弾き分ける一方で、ピアノのアクション機構はその鍵盤を叩く／押し込む操作に応じた運動量をハンマーに与えるように機能して、ハンマーが空中に飛び出す。ハンマーが打弦して音響が発生するその瞬間には、ピアニストの指とピアノ弦とは物理的に分離されているにも関わらず、両者は音楽において不可分の結び付きを持っている。

ところで「手／指」の運動というのは、脳からの指令によって運動神経を經由して筋肉が収縮駆動されているが、その筋電情報は脳から直接でなく皮膚の表面に貼り付けた電極からも検出可能であり、この生体信号をEMG(筋電図)信号という。「義手を制御する」という目的のEMG研究の歴史は古く、筋電信号を検出→そのニュアンスを認識→義手を制御、という技術は現在でも改良が続いている。筆者はコラボレータの照岡正樹氏(ルイ・パストゥール医学研究センター)と生体情報センシングの研究を1990年代から続けており、3世代にわたって開発した筋電楽器「MiniBioMuse」シリーズ⁴⁰⁾では、実際に作品で活用した公演は国内9都市・海外12都市に及ぶ¹⁴⁾(図2は、第3世代の「MiniBioMuse-III」の片腕8チャンネルのセンサ電極ベルト)。これに続く「Wiiリモコン用の筋電センサ・ストラップで手首から先のニュアンスを認識する」というゲーム系企業からの受託研究では、新しい筋電情報検出アルゴリズムを提案する⁴¹⁾⁴⁴⁾と共に、「もどもど脱力して自分に固有の筋電モーションを再現する」という一種のバイオフィードバック・ゲームの実験から、筋肉の脱力と微調整による内受容感覚(→次節で詳解)による安堵感／ウェルネス感という新しい発見があり⁴⁵⁾⁴⁷⁾、その後の追求の原点となった。

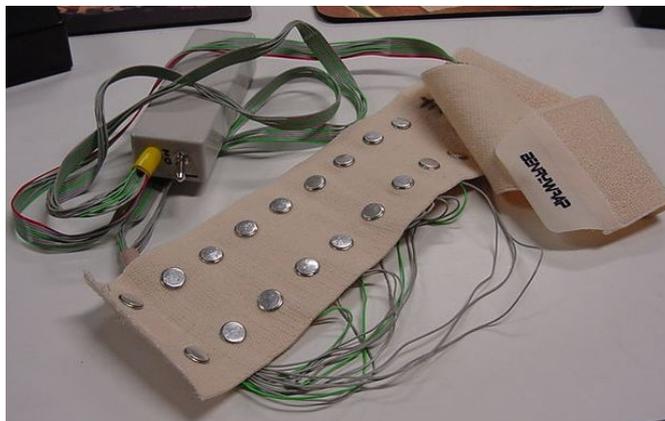


図2 オリジナル筋電センサ「MiniBioMuse-III」の片腕8チャンネルのセンサ電極ベルト

筋電センシング以外の生体情報センシングとしては、呼吸(胸郭の伸縮、末端二酸化炭素濃度)センシング／脳波センシング／皮膚電気抵抗センシング／心拍センシング／静電気センシングなどの研究も進めたが、照岡氏との共同開発として2016年に公開したオリジナル筋電センサ「VPP-SUAC」⁴⁸⁾では、4チャンネルの筋電センシング情報をWiFi経由でホストに送るだけでなく、基板上optionジャンパの変更によって脳波センサとしても使用できるようにした(全ての設計データ／ファームウェア等をWeb公開し、誰でも再現製作可能)。ただし脳波センサは、(1)開眼していると外眼筋から脳波電極へのノイズ混入が大きいため閉眼を求められる、(2)データが確定するまでの計測時間として数秒～10数秒を必要とする(反応が緩慢)、

という2点の理由から、筆者は音楽インターフェースとしての脳波利用は志向していない^{49)・51)}。

音楽インターフェースとして筋電情報の最大のメリットは、他のセンサが「演奏者の身体動作が起きる→それを検出する」(関節の動き/角度や加速度の検出、スイッチやスライダの操作検出、身体マーカーの動きを画像認識で検出など)ことの本質的な遅れを伴うのに対して、筋電は「これから筋肉を動かす」という脳からの指令(筋電信号)を100msecオーダーで事前に察知できるという優位性である。他のセンサは誤差と遅延を伴う事前予測モデルが必須なのに対して、直前ながら先にストレートに出てくる筋電情報の魅力は、時間的要請の大きい音楽表現において今後も注目していきたい。

3. 「バイオフィードバック」というインタラクティブ・メディアアート

オリジナル筋電センサ開発や筋電ジェスチャ認識の研究を進めて学会発表を続けていたところ、かつて1990年代に多くの記事を執筆していた⁵²⁾CQ出版社から依頼されて、「インターフェース」誌2015年4月号「人体/生体の信号処理」特集に寄稿した⁴⁰⁾⁵³⁾。この記事を読んだ甲南女子大学(当時)の辻下守弘氏からのコンタクトを受けて始まったコラボレーションが、現在まで続くバイオフィードバック研究の契機である。最初は、生体情報センシング技術やメディアアートを専門とする筆者と、リハビリテーション専門家である辻下氏との接点は一見すると遠いものに思えた。しかし辻下氏はリハビリにおけるバイオフィードバック(クライアント自身に自分の生体情報をライブに返すことで自律的なリハビリを支援する)の重要性を追求し続けてきており、交流/議論を進める中で想像以上に「ずばり」の相性であることが判明し、共に開催した甲南女子大学⁵⁴⁾/人間環境大学⁵⁵⁾/奈良学園大学⁵⁶⁾での計3回の「バイオフィードバックセミナー」では、リハビリ教育の専門家、社会人大学院生の看護師/介護士/療法士、リハ福祉機器メーカーの経営者、など多くの関連領域との交流が実現した。

メディアアートの領域から見れば、生体情報センシング入力に対して、一種のシリアスゲームとしてインタラクティブ・マルチメディアを駆動してクライアントに返す、というシステムは、インストール作品として典型的な作品制作課題(デザイン系の学生であればサクサクと描いた魅力的なキャラクタをプログラムで動かすことなど容易)である。一方、海外製の高価で融通の利かないリハビリ装置に難儀してきた現場の専門家にとっては、センサや関係性などを自在にカスタマイズした「自前のシステム」が、オープンソース文化の賜物として自分の手でもデザインでき得る、というバイオフィードバック・リハビリテーションへの可能性は画期的なものと映った。この流れを受けて、奈良学園大に拠点を移した辻下氏に依頼され、筆者は奈良学園大リハビリテーション学科「先端リハビリテーション論」の一部を非常勤講師として担当し、このような自由な発想の可能性を「療法士の卵」学生と共に議論し、さらに研究科においては実際に「何か試作してみる」可能性にもチャレンジしつつある。

V. 内受容感覚とウェルネス・エンタテインメント

1. 内受容感覚と情動/意思決定

ボルツは「知覚の問題とは眼や耳など感覚器官でなく脳の構造(つくり)の問題である」と指摘した⁵⁷⁾。従来のセンシング技術は、主として人間の「視覚」「聴覚」「触覚」へ、あるいは「五感」のチャンネルを指向してきたが、これらの感覚/知覚は専用の感覚器によって得られた情報が神経系を通じて脳に届くもので、「外受容感覚」と総称される。外受容感覚からの情報は脳内処理によって意味化・言語化・顕在化されるが、脳の処理能力には限りがあるため、生命維持本能によって瞬時の判断が求められる優先度がある。そこでヒトの脳の生物進化的な戦略として、無意識下にモニタされている情報/刺激のうち、生存に有利なものや潜在的予想/期待から逸脱したものが優先して意識/注意のレベルに浮上する境界が生まれ、このメカニズムをフロイトは「前意識」、ダマシオは「原自己」⁵⁸⁾、下條信輔は「前注意過程」⁵⁹⁾と呼んだ。意識/覚醒のレベルに到達した外受容感覚の情報は脳の知覚認知処理の対象として、外界と自己の認識、様相性/統一性/志向性、共感性/親近性、図と地/ゲシュタルトなどの特徴処理を受けて人間の判断/行動/記憶などに高速に反映される。

これに対して、内臓や血管の状態、内分泌系の化学物質、横紋筋などからの神経系によって脳が知覚するのが「内受容感覚」(interoception)である。情動(emotion)を誘発する刺激(ECS)が出現すると、身体各

部(筋肉/関節/内臓)の情報は末梢神経→脊髄→脳幹→体性感覚皮質と集まってくるとともに、身体の活動によって生じた化学物質も血流から脳に作用する。意識としてECSに気付いていなくても扁桃体が反応し、さらに前脳基底・視床下部・脳幹が対応して機能する。これが「情動反応」として脳から身体各部に届く神経系の作用であり、自律(内臓)神経系の信号は進化的に古い領域(扁桃体/帯状回/視床下部/脳幹)から、また筋骨格(随意)神経系の信号は運動皮質と皮質下運動核から出る。さらに脳から血液中の化学物質(ホルモン/神経伝達物質/調整物質)が身体各部に分泌放出され、身体内部の環境変化や、内臓/筋骨格などの一時的変化や特定の行動が起きる。下層の情動には欲求(空腹感・喉の渇き・好奇心・探究心・気晴らし・性欲)、中層には「苦(→事後の罰)」や「快(→事前の報酬)」と結びついた行動、上層には社会的情動(喜び・悲しみ・恐れ・嫌悪・プライド・恥・共感など)があり、その統合された最上位に感情(feeling)が位置する。このような内受容感覚と感情/意思決定との関係⁶⁰⁻⁶¹⁾は本研究の重要な基盤であり、前述した手首から先の筋電ジェスチャ認識の研究で、「ももも脱力して自分に固有の筋電モーションを再現する」という一種のバイオフィードバック・ゲーム(図3)の「筋肉の脱力と微調整」によってヒットした時に多くの被験者が感じた「快の情動」と結び付いてくる。



図3 手首から先の筋電ジェスチャ検出ゲームの画面例

地球上の生物進化において、特にヒトは生存に有利なホメオスタシス維持のために、間脳視床下部や自律神経系や内分泌系を高度に発達させてきた。その結果、脳は内受容感覚によって身体/環境と結びついて意識/自己を形成し、無意識下の予測/期待に対応した瞬時の判断を行う情動として、特に「快」の報酬系を発達させてきた。ダマシオのソマティック・マーカー仮説(SMH)によれば、実際に神経系や化学物質が到達しなくても脳内の仮説ループが情動として瞬時の判断を行い、結果を評価/補正することで無意識下の予測が強化/学習される⁶²⁾。そして、潜在的な予測と感覚/知覚が一致すると「親近性原理」から「快」となり、潜在的な予測が感覚/知覚に裏切られても「新奇性原理」(AHA!感)から「快」となり、いずれも学習において「予測」への高速反応が進む脳へとヒトの進化が加速された(感覚皮質の暴走仮説)⁶³⁾。ポピュラー音楽やクラシックが大衆に好まれるのは予定調和的な親近性にに基づき、一方でフリージャズや即興音楽は新奇性にアピールして好まれる。この矛盾するようで納得できる「快」の両極性は、本研究においても指導原理の一つとして重視している。

2. 触覚と触感によるウェルネス・エンタテインメント

メディアアートのデザインには大別して「ニーズ指向」「シーズ指向」の二つがあり、古典的な芸術では「ニーズ指向」(○○を表現したい、○○を伝えたい、それにはどんな実現手法があるか)が主流だった

のに対して、それまで存在していなかった新しい技術が登場すると、この技術を活用した何かが作れないか、という「シーズ(種)指向」のアプローチが出現した。日本のアールティ社が発表した「PAWセンサ」は、直径15mm×高さ10mmほどの円筒形のウレタンが21.5mm×25mmの基板の上に密着して載った構造である。このウレタン充填密封された空間には、異なった位置に配置された2個の赤外線LEDと2個のフォトトランジスタ(光センサ)があり、ホスト(マイコン)からLEDを点灯させて、フォトトランジスタの受光電圧を出力する。2個のLEDを250μsecごとに交互に時分割点灯させ異なる場所のフォトトランジスタの出力を別々に検出することで、ウレタン密度変化による光量変化として「指先に弾力を返す円筒形のウレタン」をうにうにするニュアンスが4チャンネルの連続値としてリアルタイムに得られる⁶⁴⁾。

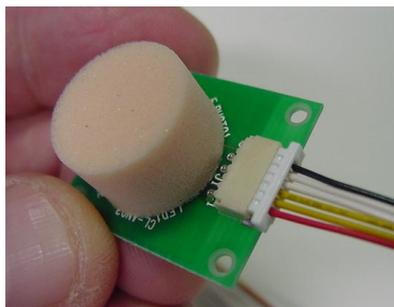


図4 PAWセンサ

このPAWセンサ(図4)は、非接触の距離センサや画像認識センサとも、皮膚電極による筋電等の生体情報センサとも異なり、人間の最上の高精度コントローラである「指先」と密に接触すると共に操作に対応した「柔らかな反発」という素直なリアクションを指先に返す、という類い稀なセンサである。これをシーズとして活用しない手はないということで、初代(PAWセンサ1個)の触覚/触感インターフェース試作機⁶⁵⁾を貸与した学生作品⁶⁶⁾が制作されるのと並行して、2代目として掌に包み込むような透明卵型ケース表面に両手10本の指に対応して10個のPAWセンサを配置した新楽器「MRTI2015」を開発した。10個のPAWセンサから得られる計40チャンネルの触覚/触感情報に対応したマルチメディア生成アルゴリズムとしては、サウンド生成には複数のフォルマントを持つ「猫のような鳴き声」音響を多数生成し、グラフィクス生成には数値計算による抽象的なライヴ・2Dフラクタル描画生成を初めて採用した(その詳細については参考文献⁶⁵⁾⁻⁷⁰⁾および実験動画⁷¹⁾を参照されたい)。

この「MRTI2015」は新楽器として開発したものの、これまでコンサート等の音楽公演で使用したことはなく、インスタレーション(バイオフィードバック体験)作品として各地で展示し、多種の一般ユーザに使用感などをアンケート調査した。ここで印象的だったのが、国際会議: Sketching2015(アリゾナ)とSI2015(シンガポール)での展示における体験である。オープンソース・ハードウェアのスケッチング(物理コンピューティング)専門家が世界中から集うSketching2015のデモ展示セッションでの写真を後で見返してみると、MIT/NYU/CMU/Stanford/Intel/Google/Microsoftなど錚々たるハイテク専門家がこのシステムを操作している時に、誰もが思わず子供のように「笑顔」でいる事に驚いた⁷²⁾。依頼されてSI2015に併設のSingapore Art Museumデモブースで展示してみると、ここでも専門家だけでなく来場した一般市民や子供たちもまた、「笑顔」(言葉も不要、理屈なし)でこの不思議な体験を楽しんでいた⁷³⁾。両手指先の自由なコントロールによって生成される不思議なサウンド/グラフィクスの変化、同時に体感する両手指先への柔らかな反発力、この触感(から来る内受容感覚)による「快」の情動、というエンタテインメントの可能性をここで確信することになった。

人間の指は薬指と小指が連携して動くことから「筐体を保持する小指を除く8本の指」用の8系統PAWセンサ(3代目の触覚/触感インターフェース)として次に開発したのが「PAW-eight」である。伏せたサラダボウルを筐体として左右4個ずつのPAWセンサを配置して、このシステムでは最初から「没入体験型ウェルネ

ス指向」 インスタレーション作品を狙ってみた。Maxで実装した暗黒の3次元空間内に浮かぶのは、立方体(その中心[重心]にはさらにブラックホール)を等間隔に構成する $8 \times 8 \times 8 = 512$ 個の小型反射球体である。初期状態でこの立方体の頂点に位置する8個の輝点(光源)から、それぞれ中心に向かうベクトルの「距離(大きさ)」に、8個のPAWセンサの情報をマッピングした。サウンドとして中心からの距離に応じたピッチの純音が鳴るので、8系統の甲高く唸った耳障りなサウンドが鳴るところからスタートする。

目標としては「この8個の輝点を全て、中心にあるブラックホールの内部に取めたい」というバイオフィードバック・ゲームであるが、極限までPAWセンサのスポンジを押し潰すのではなく、半分程度の強度で、かつ4チャンネル出力がほぼ同じになるように「平坦に優しく」押す必要がある。8個の輝点は、それぞれのPAWセンサを押す力が強度レンジの中央付近で中心のブラックホール内部に来るように移動し、それより強くても弱くても中心から離れてサウンドのピッチが上がり耳障りになる。さらにセンサの4チャンネル出力がでこぼこした状態であれば移動するベクトル成分が中心から「逸れる」方向に作用して、距離が大きくなってこれも耳障りになる。ブラックホール中心付近に8輝点が全て集結してくるとサウンドが静かな低音(→中心なら消滅)となると共に宇宙空間をイメージする残響(リバーブ)も深く広がり、反射球体による輝点の反射光が減って空間全体が暗くなると、自然に心安らかに落ち着いてくる、という状況(これが嬉しい)に近付くようなゲーム性をデザインした(図5)。

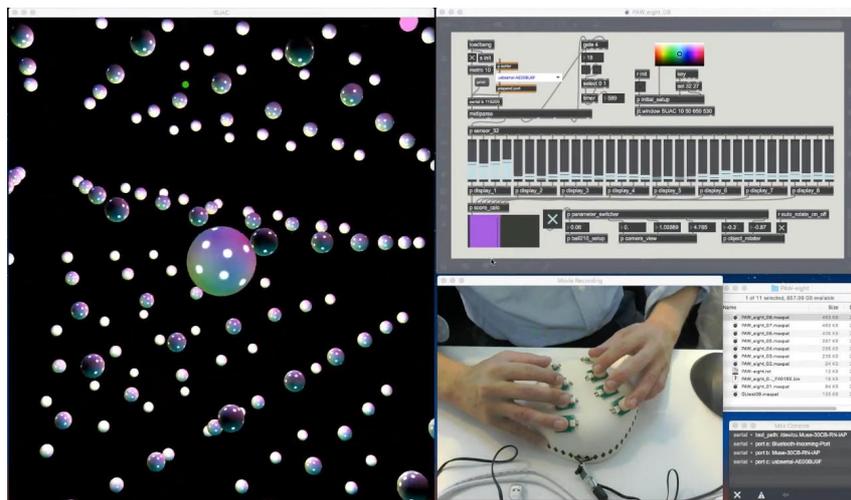


図5 「PAW-eight」によるインスタレーション

すると、前述の筋電ジェスチャ認識における緊張／弛緩の中間帯での筋電リラックスとかなり似た状態となり、程良く「平坦に優しく」押す圧力／脱力と、指先からの柔らかな反発力という触覚リアクション(嬉しさ)には、筆者の内感ではウェルビーイング状態を実感することが出来た。奈良学園大(リハビリテーション学科)のオープンキャンパスでこのシステムを展示する機会も得たが、参加した高校生や専門家(教員)に試してもらった感触／感想も筆者と類似のものが多く、広義のエンタテインメントとして、この「嬉しさ／面白さ」が内受容感覚から来る情動であると確信した⁷⁴⁾⁷⁷⁾。このシステムはSketching2019(デトロイト)でのデモ展示⁷⁸⁾、およびAM2023(エディンバラ)に採択されたインスタレーション展示⁷⁹⁾の場においても、多くの専門家／アーティストに体験してもらったが、ここで再び「多くの笑顔」に遭遇した。特に、AM2023⁷⁹⁾では小型のPC用ディスプレイでなく、暗くした室内に大型プロジェクタでの大画面表示と良好な音響システムを用いたことで、まさに宇宙空間の中に没入する不思議な体験を提供できた。

3. 「錯覚」の活用

PAWセンサを用いた「触覚/触感センサ」を第3世代の「PAW-eight」まで開発/実験して、その「内受容

感覚ウェルネス・エンタテインメント」バイオフィードバックの可能性に確信を得たことで、次に第4世代として開発したのが、PAWセンサを2個だけ使ったコンパクトな新インターフェース「PAW-double」である⁸⁰⁾。PAWセンサの数だけみると減ってしまったようだが、2個あれば両手それぞれの指(計8チャンネル)でコントロールすることで、脳内の複数領域(触覚、視覚、聴覚、筋肉からの脱力感など)が同時に活性化されるという目的は最低限、達成できる。そしてここではオープンソースの潮流を活用して、全ての部品をネット入手して、基板の作り方からmbedマイコン(NucleoF401RE)の完成されたファームウェア(公開バイナリをドラッグ&ドロップでmbedに書き込むだけなのでプログラミングは不要)、ホストのMax実験パッチまでを完全にWeb公開して、ここ⁸⁰⁾を見れば「(頑張れば)誰でも作れる」状態にしたところが最大の特長である(図6)。

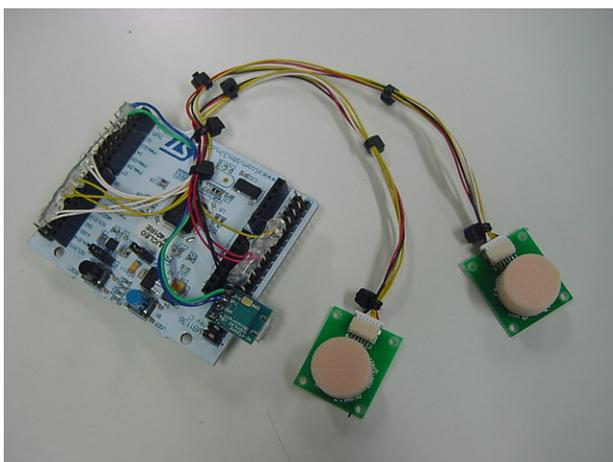


図6 PAW-double

実際に10数個の「PAW-double」を製作して講義の中で使ったり、ワークショップの場で参加者に貸与して一緒に実験したりする中で、さらにメディア心理学を学ぶデザイン学生の自由な発想によって、応用の可能性を探求した。ここに主要なテーマとして登場してきたのが「錯覚」である。基礎心理学の世界では一つの重要な領域である「錯覚」とは、人間が「こうだろう」と思い込んでいる予想/予測などの先入観に対して意外感/開放感/「AHA!感覚」など、先入観を裏切る驚きを生み出すものであり、脳科学的には錯覚の活用は「脳活性化」というMCI予防にまでその効能が指摘されている。

ところで従来の錯覚(ここでは錯視)の多くは、「錯視画像」という静止画として報告されてきた。画面内のAとBが異なって見えるのに実はAとBは同じもの、とか、静止画なのに眺めているとどこかグルグル動いて見える、とか、直線で出来ているのに曲がって(歪んで)見える、などである。しかし、インタラクティブ・マルチメディアのシステムとして優秀な「触覚/触感センサ」(PAWセンサ)を持ったからには、固定的でない「錯覚のバイオフィードバック」を目指したい、という姿勢から実験/検討を進めた⁸¹⁾⁻⁸²⁾。このシステムの使用感アンケートを目的として、2024年11月には大垣で開催される「Ogaki Mini Maker Fair2024」⁸³⁾⁻⁸⁴⁾への展示参加(「PAW-double」を使った約10作品の「インタラクティブ錯覚体験インスタレーション」を体験展示)が決まったところであり(本稿執筆時点)、その報告/考察についてはいずれ機会をみて発表したい。

4. フラクタル科学の活用

脳の感覚皮質の進化のうち「新奇性原理」に対応した「不思議なグラフィクス体験」による脳の活性化として、前述の「(インタラクティブ)錯覚」に加えて久しぶりのリバイバルとなったのが、フラクタル科学の応用というテーマである。錯覚がある種の「騙し絵」として興味深いのに対して、拡大しても細部に同じ構造が出現してくるフラクタル画像というのは、その「美」と共に「不思議」という刺激が心地良い

のだが、単なる静止面の錯視画像に比べてインタラクティブに変化させる事で劇的に面白くなる「インタラクティブ錯覚」と同様に、ただ見るだけでなく、微小なパラメータ変化でもフラクタル構造が劇的に変化する「インタラクティブ・フラクタル」体験を実現する、というのが新しいテーマとなった。もちろんこのインターフェースとしてPAWセンサの「触覚/触感」という内受容感覚チャンネルは重要であり、さらにもう一つ重要なのは、コンピュータ技術の進展によって、微細なフラクタル演算をリアルタイムに実行して描画することが容易になってきた、という事実である⁸⁵⁾⁻⁸⁶⁾¹⁷⁾。

1990年代前半のMacの能力は現在に比べて1000分の1以下と非力であり、筆者が1990年代にライブComputer Music作品の公演を行う際には、インタラクティブ全体の記述とMIDIプロトコルでのサウンド部分にはMacを使用したものの、サウンド生成パートにはサンプラーやオリジナル製作シンセサイザやSGI社のIndyワークステーションやサウンド生成専用機"Kyma"などを使用した¹⁹⁾。そしてライブ・グラフィクスのパートについては、当時のMaxが持っていた「Draw系描画/PNG画像表示」程度の"lcd"オブジェクトを使用することは稀で、AMIGAコンピュータ、カオス描画専用オリジナルソフトのPC、IndyワークステーションのOpen-GLグラフィクス、NTSCビデオのライブ・スイッチング/マルチスクリーン分配(MIDI切り替え専用機を開発)などを組み合わせて使用し、2000年前後に登場したグラフィクス生成ソフト「image/ine」も別Macにて併用した。2002年にはMax/MSPの一部としグラフィクス機能を飛躍的に発展させた"jitter"が発表され(筆者がプロデュースしたMAF2002内のDSPSS2022において世界に先駆けて日本で発表⁸⁷⁾)、ここでようやく「1台のMacのMaxでサウンドもグラフィクスも生成」「メディア心理学の実験ツールをMaxで制作可能」という段階に入ったが、まだまだ非力で満足なレベルではなかった。

MIDI(内部情報はオリジナル規定)やOSCなどのプロトコルを活用することで、システムを複数台のコンピュータで構成する手法はその後も続いたが、"jitter"のOpen-GL機能を拡張するライブラリなどが発表されることで、次第に「Maxで画像認識」や「Maxでライブ3D-CGレンダリング」という手法も採用した。モニターとして「現在のCPU専有率」を表示しつつ作曲(プログラミング)を進めていると、ピーク時には50%とか70%という限界に近いレベルに達して、マシンの放熱(空冷)やライブ公演中の停止リスク回避なども一つのテーマとなった。そして2015年頃に新たにMaxに負荷された機能が"GEN"であり、ここではPCに内蔵されたGPUまでをリアルタイム信号処理(サウンド生成/グラフィクス処理)に活用するという時代になった¹⁷⁾⁸⁶⁾。ここでもオープンソースのMaxコミュニティはその拡張と普及を支援して、高性能に進化したコンピュータを活用して、過去にはワークステーションでのみ実現されていたリアルタイム・マルチメディア機能が獲得される時代になった。これはニューラルネットワークの実験において、1990年代には筆者の非力なPCで「学習」に2週間も連続運転を必要としたのに、現在であればGPUを活用したPCで瞬時に深層学習ネットワークが構成されるようになった事実と対応している。

GENを活用してライブ・フラクタル描画アルゴリズムをセンサによってインタラクティブに駆動する、というテーマで作曲した作品"Profound Recursion"を初演したのは、2023年12月、指導してきた大学院生・王福瀛の修了制作のライブComputer Music作品を初演する場として、さらに筆者のSUAC(静岡文化芸術大学)での24年間の「最終講義」という性格を併せ持つイベント"Final Lecture/Workshop by YN"での「Mini-Live」コンサートであった⁸⁸⁾⁻⁸⁹⁾。この作品のメイキングについては参考資料⁸⁶⁾に詳しいのでここでは省略するが、この作品のライブ・フラクタル生成アルゴリズムでは歴大な生成パラメータを発見し、作品ではそのごく一部しか利用できなかった。さらにこの作品では10チャンネル赤外線距離センサを活用した新楽器"Dodecahedron"⁸⁶⁾を使用していたので、PAWセンサによる「触覚/触感」インタラクティブは棚上げしていた。そこで、まだ未開拓の生成パラメータを活用して、ここに「PAW-double」を使用したバイオフィードバック・インスタレーション作品の可能性を目指して実験中であり、将来的に完成させて発表することが当面の目標である。これについても、その報告/考察はいずれ機会をみて発表したい。

VI. おわりに

メディアアートを起点に、バイオフィードバックとの出会いなどを経て現在までの研究の進展について報告した。2020年のCOVID-19によって、その頃に計画していた「フィールド調査」(高齢者施設でのユーザ体験調査、MCI予防効果についての検証など)が全て棚上げとなってしまった3年間は残念だったが、今後、機会があればこの領域についても調査検討を進めていきたい。1980年代には情報処理学会で「音楽への応用」などと発表すれば「遊んでいる」と白い目で見られて「窓際」を体感していたが、その後に音楽情報処理研究が発展してみれば、音楽情報検索/音楽リコメンド(推薦)技術/歌声合成などの技術は現代のビジネスシーンを牽引するに至った。同様にかつて「エンタテインメント・コンピューティング」に関して発表しても「遊んでいる」と決めつけられていたが、海外でのシリアスゲームの流れが日本にも伝わってきてからは、その「役立つ」重要性が認知され、さらに時代はウェルネス/ウェルビーイングを求めるために「本流」となってきた。研究テーマに貴賤はなく、自分の内感を信じることも重要であろう。

今後の課題/展望としては、オープンソース文化を尊重して常に全情報を公開すると共に、さらにコラボレーションを広げるためにあらゆる機会を求めて他分野の人々と臆することなく交流/議論を求めていくこと、裾野を広げていくための普及/教育活動を重視すること、を挙げておきたい。本論文に触れたことで興味を持たれた方々からのコンタクトをお待ちしている。

VII. 利益相反について

本論文内容に関連する利益相反事項はない。

文献 (References)

- 1) <https://japan-who.or.jp/about/who-what/charter/>
- 2) <https://www.jsrpd.jp/rehabilitation/ideal/>
- 3) <https://www.mhlw.go.jp/topics/2002/04/tp0419-3c.html>
- 4) <https://www.kumamoto-ymca.or.jp/fitness/1578.html>
- 5) Anthony Brooks. <http://dk.linkedin.com/in/anthonylewisbrooks>
- 6) Brooks, A. L. Active and Non-Active Volumetric Information Spaces to Supplement Traditional Rehabilitation. *Journal of Research and Practice in Information Technology*, 45(2), 2013
- 7) ウェルネス・エンタテインメントやバイオフィードバックを実現するフレームワーク/ツールキットとしてのメディアアート <https://nagasm.org/Sketching/>
- 8) フォン・ベルタランフィ. 一般システム理論: その基礎・発展・応用, みすず書房, 1973
- 9) イリヤ・プリゴジン. 混沌からの秩序, みすず書房, 1987
- 10) スティーヴン・ストロガッツ. SYNC: なぜ自然はシンクロしたがるのか, 早川書房, 2005
- 11) 蔵本由紀. リズム現象の世界, 東京大学出版会, 2005
- 12) 郡宏. 生物リズムと力学系, 共立出版, 2011
- 13) 長嶋洋一. マルチメディア作品におけるカオス情報処理の応用(研究ノート), 京都芸術短期大学紀要 [瓜生] 第18号, 1996
- 14) <https://nagasm.org/ASL/YouTube.html>
- 15) 長嶋洋一. カオスに対する聴覚的なアプローチ, 電子情報通信学会非線形問題研究会資料 (技術研究報告) NLP2011-158, 2012
- 16) 長嶋洋一. サウンド知覚のカオス共鳴によるモデル化に向けて, 電子情報通信学会非線形問題研究会資料 (技術研究報告) NLP2013-144, 2014
- 17) 長嶋洋一. フラクタル/カオスのライブ生成に関する高速化の検討, 電子情報通信学会非線形問題研究会資料 (技術研究報告) NLP2023-01, 2023
- 18) 生体センサとMax4/MSP2による事例報告. <https://nagasm.org/ASL/SIGMUS0202/>
- 19) インタラクティブアートの統合的システム・プラットフォームとしてのMax/MSP. <https://nagasm.org/ASL/dsps2002/>
- 20) 長嶋洋一. 基礎心理学実験プロトタイプツールとしてのMax7とウェルネスエンタテインメントプ

- ラットフォームとしてのMax7, 情報処理学会研究報告 (2018-MUS-120), 2018
- 21) 長嶋洋一. 音楽情報科学ツール"Max"を用いたメディアデザイン: RFIDの活用例を中心として, 情報処理学会研究報告 (2019-MUS-124), 2019
 - 22) 長嶋洋一. コンピュータサウンド教育のためのインタラクティブ環境について: Max, SuperCollider, Processing, SonicPi, およびMozziの検討, 電子情報通信学会応用音響研究会資料 (技術研究報告) 2022-08-EA-H, 2022
 - 23) Max前夜. <https://nagasm.org/ASL/max02/>
 - 24) Workshop in Berlin 2000. <https://nagasm.org/ASL/berlin/>
 - 25) Workshop in Amsterdam 2004. <https://nagasm.org/Sabbatical2004/0826/steim02.html>
 - 26) Keynote Lecture in Taiwan 2007. <https://nagasm.org/ASL/Taiwan2007/>
 - 27) Tutorial in Paris 2009. <https://nagasm.org/ASL/ICEC2009/>
 - 28) Open Lecture in Moscow 2016. <https://nagasm.org/1106/news5/docs/Tour2016.html>
 - 29) Workshop in Poznan 2018. <https://nagasm.org/ICEC2018workshop/>
 - 30) Interactive Multimedia Generated by Rubbing/Tactile Interfaces - Biofeedback Effects for Wellness Entertainment. <https://www.youtube.com/watch?v=MkV6Vrv5Wtc>
 - 31) 長嶋洋一. 「システム開発技術」に関する時間学的考察. <https://nagasm.org/ASL/Jikan2023/>
 - 32) <https://www.cnmat.berkeley.edu/OpenSoundControl/>
 - 33) <https://github.com/firmata/protocol>
 - 34) 長嶋洋一. 改造による新楽器の創造, 情報処理学会研究報告 2011-MUS-93, 2011
 - 35) 長嶋洋一. 新楽器へのアプローチ, 情報処理学会研究報告 2015-MUS-108, 2015 https://nagasm.org/ASL/paper/SIGMUS201508_2.pdf
 - 36) 長嶋洋一. シーズ指向による新楽器のスケッチング, 情報処理学会研究報告 2009-MUS-080, 2009
 - 37) 長嶋洋一. 新楽器をデザインする」というエンタテインメン, エンタテインメントコンピューティング 2021講演論文集, 2021
 - 38) Untouchable Instrument “Peller-Min”. <https://nagasm.org/ASL/paper/NIME2010.pdf>
 - 39) <https://www.youtube.com/watch?v=nLZP1Y6PNfs>, <https://www.youtube.com/watch?v=qydojZZ-KnI>
 - 40) https://nagasm.org/ASL/CQ_mbed_EMG.html
 - 41) 長嶋洋一. 筋電楽器における音楽的ニュアンスの認識に向けて, 電子情報通信学会 ヒューマン情報処理研究会 研究報告集, 2010
 - 42) 長嶋洋一. 新しい筋電楽器のための筋電情報認識手法, 情報処理学会研究報告 2010-MUS-085, 2010
 - 43) 長嶋洋一. 新しい筋電楽器のジェスチャ・表現の検討について, 日本音楽知覚認知学会2010年春季研究発表会資料, 2010
 - 44) 長嶋洋一. 筋電センサのジェスチャ認識に関する新手法, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解研究会資料 (技術研究報告) PRMU2015-54, 2015
 - 45) 長嶋洋一. 内受容感覚コントローラとしての筋電楽器: 癒し系エンタテインメントのために, 日本音楽知覚認知学会2015年春季研究発表会資料, 2015
 - 46) 長嶋洋一. 内受容感覚とバイオフィードバックに注目した筋電情報ジェスチャ認識によるエンタテインメント, 情報科学技術フォーラム2015講演論文集, 2015
 - 47) 長嶋洋一. 内受容感覚バイオフィードバックによる“癒し系エンタテインメント”の考察, エンタテインメントコンピューティング2015論文集, 2015
 - 48) 新・筋電センサシステム「VPP-SUAC」. <https://nagasm.org/Sketching/VPP-SUAC.html>
 - 49) 脳波センサ”MUSE”は新楽器として使えるか. <https://nagasm.org/ASL/paper/SIGMUS201603.pdf>
 - 50) 脳波センサ”Muse 2”・”Muse S”は新楽器として使えるか. <https://nagasm.org/ASL/paper/SIGMUS202011.pdf>
 - 51) 新・生体センサシステム”EmotiBit”は新楽器として使えるか. <https://nagasm.org/ASL/paper/SIGMUS202109.pdf>
 - 52) <https://nagasm.org/ASL/Interface/>

- 53) <https://nagasm.org/1106/news4/20150223/>
- 54) <https://nagasm.org/ASL/BFseminar20151012/>
- 55) <https://nagasm.org/ASL/BFseminar20160228/>
- 56) <https://nagasm.org/ASL/BFseminar20180331/>
- 57) ノルベルト・ボルツ. グーテンベルク銀河系の終焉: 新しいコミュニケーションのすがた, 法政大学出版局, 1999
- 58) アントニオ・ダマシオ. 無意識の脳 自己意識の脳, 講談社, 2003
- 59) 下條信輔. 「意識」とは何だろうか: 脳の来歴、知覚の錯誤, 講談社, 1999
- 60) 寺澤悠理, 梅田聡. 内受容感覚と感情をつなぐ心理・神経メカニズム, 心理学評論, Vol.57, No.1, pp49-76, 2014
- 61) 大平英樹. 感情的意思決定を支える脳と身体の機能的関連, 心理学評論, Vol.57, No.1, pp140-154, 2014
- 62) Anil K. Seth. Interoceptive inference, emotion, and the embodied self, Trends of Cognitive Science, 17, pp565-573, 2013
- 63) 下條信輔. サブリミナル・インパクト: 情動と潜在認知の現代, 筑摩書房, 2008
- 64) 長嶋洋一. お触り楽器, 情報処理学会研究報告 2015-MUS-108, 2015 https://nagasm.org/ASL/paper/SIGMUS201508_1.pdf
- 65) http://www.youtube.com/watch?v=n7K7x0_2dD8
- 66) <http://www.youtube.com/watch?v=8rwjmhainZs>
- 67) Yoichi Nagashima. Multi Rubbing Tactile Instrument, Proceedings of International Conference on New Interfaces for Musical Expression, 2016 https://nagasm.org/ASL/paper/NIME2016_nagasm.pdf
- 68) Yoichi Nagashima. Towards the BioFeedback Game : with Interoception and Rehabilitation, Proceedings of the 8th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications, 2016 <https://nagasm.org/ASL/paper/VS-Games2016.pdf>
- 69) Yoichi Nagashima. Bio-Sensing and Bio-Feedback Instruments : DoubleMyo, MuseOSC and MRTI2015, Proceedings of 2016 International Computer Music Conference, 2016 https://nagasm.org/ASL/paper/ICMC2016_nagasm.pdf
- 70) 長嶋洋一. 生体情報センシングのバイオフィードバック療法への応用について, 電気学会 知覚情報研究会・研究報告, 2017
- 71) <http://www.youtube.com/watch?v=LF7KojKRP2Y>, <http://www.youtube.com/watch?v=2SD84alrN1A>, <http://www.youtube.com/watch?v=FM1Af3TyXNk>, <http://www.youtube.com/watch?v=u6Gb62DBv7A>
- 72) <https://nagasm.org/1106/Sketch2015/Happy.html>
- 73) <https://nagasm.org/1106/SI2015/Happy.html>
- 74) 長嶋洋一. 生体情報センシングと内受容感覚コミュニケーションの可能性について, 電子情報通信学会 ヒューマンコミュニケーション基礎研究会資料 (技術研究報告) HCS2017-102, 2018
- 75) 長嶋洋一. 「触覚バイオフィードバック」汎用プラットフォームの提案: メディアアートのウェルネスデザイン応用を目指して, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会資料 (技術研究報告) HIP2018-39, 2018
- 76) 長嶋洋一. メディアデザインにおけるバイオフィードバック応用の事例報告, 電子情報通信学会MEとバイオサイバネティックス研究会資料 (技術研究報告) MBE2021-01, 2021
- 77) <http://www.youtube.com/watch?v=Xst9dXRCALU>, <http://www.youtube.com/watch?v=C0oaxStd5Q4>, <http://www.youtube.com/watch?v=ObDPpRR5oiE>, https://www.youtube.com/watch?v=eO_BE6yAKU
- 78) <https://nagasm.org/1106/Sketch2019/Happy.html>
- 79) <https://nagasm.org/1106/Edinburgh2023/Happy.html>
- 80) 新・触覚センサシステム「PAW-double」. <https://nagasm.org/Sketching/PAW-double.html>
- 81) 長嶋洋一. ウェルネス・エンタテインメントのための錯覚体験システム: 聴覚やマルチモーダル錯覚を中心として, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会資料 (技術研究報告) HIP2019-87, 2020
- 82) 長嶋洋一. ウェルネス・エンタテインメントのためのインタラクティブな錯覚体験システムに向けて, 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション基礎研究会資料 (技術研究報告) HCS2021-29, 2021
- 83) <https://www.iamas.ac.jp/ommf2024/>
- 84) <https://nagasm.org/1106/news6/docs/pastOMMF2.html>

- 85) 長嶋洋一. 触覚/触感インターフェースとライブ生成フラクタル/音響によるウェルネス・エンタテインメント, 電子情報通信学会非線形問題 (NLP) 研究会資料 (技術研究報告) NLP2022-01, 2022
- 86) 長嶋洋一. ライヴComputer Musicのための非線形フィードバックの活用, 情報処理学会研究報告 2023-MUS-139, 2024 <https://nagasm.org/ASL/paper/SIGMUS202403.pdf>
- 87) <https://nagasm.org/1106/news5/docs/DSPSS2002.html>
- 88) <https://nagasm.org/1106/MDW2024/report.html>
- 89) <https://youtu.be/CpworYLSYu4> , <https://youtu.be/fLZ5MK56SEQ>